

融合 MEC 的星地协同网络：架构、关键技术与挑战

唐琴琴¹, 谢人超^{1,2}, 刘旭¹, 张亚生³, 何辞³, 李诚成³, 黄韬^{1,2}

(1. 北京邮电大学网络与交换国家重点实验室, 北京 100876; 2. 紫金山实验室, 江苏 南京 211111;
3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 在星地协同网络中引入移动边缘计算 (MEC) 技术可有效提高用户体验质量和减少网络冗余流量, 同时也带来了一些挑战。首先介绍了星地协同网络和 MEC 技术的基本架构, 并讨论了在星地协同网络中引入 MEC 技术的动机和 MEC 的部署问题; 然后提出了融合 MEC 的星地协同网络架构, 并对其关键技术及典型应用进行了概述和分析; 最后总结归纳了融合网络架构中的任务调度、移动性管理等关键挑战和一些开放性研究问题, 期望对该领域的后续研究提出可供借鉴的新思路。

关键词: 星地协同网络; 边缘计算; 任务调度; 移动性管理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2020082

MEC enabled satellite-terrestrial network: architecture, key technique and challenge

TANG Qinqin¹, XIE Renchao^{1,2}, LIU Xu¹, ZHANG Yasheng³, HE Ci³, LI Chengcheng³, HUANG Tao^{1,2}

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

3. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: The introduction of mobile edge computing (MEC) technology in satellite-terrestrial networks can effectively improve the quality of user experience and reduce network redundant traffic, but also brings some challenges. Firstly, the basic architecture of satellite-terrestrial networks and MEC technology was introduced. Moreover, the motivation of introducing MEC into satellite-terrestrial networks and the deployment of MEC were discussed. Then, the architecture of MEC enabled satellite-terrestrial networks was proposed, and the key techniques and typical applications were summarized and analyzed. Finally, the key challenges such as task scheduling and mobility management and some open research issues in integrated networks were summarized. It hopes to provide new ideas for future research in this field.

Key words: satellite-terrestrial network, edge computing, task scheduling, mobility management

1 引言

互联网在过去几十年中取得了前所未有的增长, 随着物联网 (IoT, Internet of things)、增强现实 (AR, augmented reality) / 虚拟现实 (VR, virtual reality)、4K/8K 视频传输等新兴应用的出现, 为用

户提供全球随时随地的网络接入、大规模的机器式通信和超可靠的通信已成为未来网络的发展趋势^[1]。然而, 这些新兴应用的发展也对当前的互联网提出了新的挑战。一方面, 现有基于地面的蜂窝移动网络设施易受地震、飓风等自然灾害的影响; 另一方面, 出于经济和技术的考量, 现有地面移动网络的

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2020-03-24

通信作者: 谢人超, renchao_xie@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2019YFB1804403); 广东省重点研发计划基金资助项目 (No.2018B010113001)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB1804403), The National Key Research and Development Program of Guangdong Province (No.2018B010113001)

覆盖范围有限，不能实现全方位广覆盖的服务支持，仍有大量人口无法接入互联网，尤其是在农村、孤岛、海上等区域^[2]。针对上述趋势和挑战，卫星通信网络应运而生，它具有地面蜂窝移动通信系统无可比拟的优势，不仅能够提供全天候的稳定可靠服务，还能实现真正意义上的全球广域覆盖^[3]。

星地协同网络作为一种新型网络架构，融合地面网络和卫星网络，覆盖太空、航空、陆地、海洋等自然空间，保障天基、陆基、海基等各类用户活动的信息需求，受到了产业界和学术界的广泛关注^[4-8]。由于在广泛覆盖、无缝连接和高速接入等方面具有优势，星地协同网络将在国土安全、地球观测和灾难救援等多个领域发挥重要作用。作为互联网的未来发展趋势，星地协同网络可以应对各种复杂的通信环境，受到了越来越多的国家和地区的广泛重视，并纷纷启动了相应的项目以支撑其发展，包括美国的空间通信和导航架构^[9]、欧盟的多国空间成像系统^[10]、日本的空间政策基本计划^[11]、中国的天地一体化信息网络项目^[12]等。

星地协同网络在提供泛在、可靠网络的同时，也面临着一些新的挑战，尤其是在满足用户日益增长的服务质量需求等方面。随着语音识别、人脸识别、智能交通和 3D 游戏等各种计算密集型应用及时延敏感型应用的快速发展，星地协同网络需要为用户提供各种各样的计算服务。在这种情况下，人们可以通过计算卸载的方式将用户终端的部分或全部计算任务卸载到数据中心，利用数据中心的计算资源来完成这些任务^[13-15]。但是，数据中心通常建在距离用户终端很远的地面区域。这将导致高传输成本和服务时延，可能无法满足网络中各类用户对服务质量的不同需求，如高数据速率、低时延通信和低处理能耗等^[15-18]。因此，借鉴移动网络中移动边缘计算（MEC, mobile edge computing）的思想^[19-22]，在星地协同网络中引入边缘计算技术^[23]，其核心思想是将云计算平台扩展到网络边缘甚至用户终端本身，为用户提供多层次、异构的计算资源，使用户能够在全球任何位置就近获得计算服务，快速响应用户的计算处理请求，提升用户的服务体验，减少网络的冗余流量。

由于边缘计算技术在响应速度和处理能力方面带来显著的性能提升，因此在星地协同网络下部

署边缘计算已经成为全球各界研究人员关注的重要方向之一^[24-25]。然而，尽管当前业界已有一些研究者针对星地协同网络中的边缘计算技术开展了相关研究工作，并取得了一些代表性成果，但目前关于这一领域的研究基本只考虑了边缘计算和星地协同网络结合的基本模型，并对特定的技术进行了研究，缺少对总体架构的细致设计，也没有详细考虑星地协同网络和边缘计算技术结合面临的问题和挑战。因此，本文拟对边缘计算使能的星地协同网络融合架构与关键技术及挑战展开研究。首先，分别概述了星地协同网络和 MEC 技术的基本概念及架构，并详细分析和讨论了星地协同网络中引入 MEC 技术的动机和 MEC 的部署问题。然后，详细探讨了融合 MEC 的星地协同网络架构，并对其相关研究工作、关键支撑技术以及典型应用进行了简要的分析和讨论。最后，对融合 MEC 的星地协同网络中的任务调度、移动性管理、干扰管理、异构性等关键挑战和其他的一些开放性研究问题进行了细致的分析和讨论。

2 星地协同网络与 MEC 概述

本节首先对星地协同网络、MEC 基本概念及架构进行简要的概述，然后对在星地协同网络中引入 MEC 的动机进行了分析和讨论，并探讨了 MEC 在星地协同网络中的可行部署位置。

2.1 星地协同网络概述

星地协同网络的概念是将卫星网络和地面网络集成在一起，供地面用户与卫星网络进行通信。其中包括许多的通信技术，例如卫星通信、互联网和移动无线网络等。星地协同网络通过将各种通信方法优势互补来解决不同网络体系结构的缺点，从而实现高性能和大覆盖率的网络传输。

2.1.1 星地协同网络系统架构概述

星地协同网络系统架构^[26]如图 1 所示，主要由卫星网络和地面网络 2 个部分构成。这 2 个网络可以进行独立或互操作，通过在这 2 个网络之间集成异构网络，可以轻松构建分层宽带无线网络。

1) 卫星网络

卫星网络由卫星、星座以及相应的地面基础设施（例如地面站和网络运营控制中心等）组成。这些卫星和星座处于不同的轨道，具有不同的特性。根据海拔高度，卫星网络中的卫星可分为 3 种类型：低轨道（LEO, low earth orbit）卫星，中轨道（MEO,

medium earth orbit) 卫星和地球同步轨道 (GEO, geostationary earth orbit) 卫星^[26]。

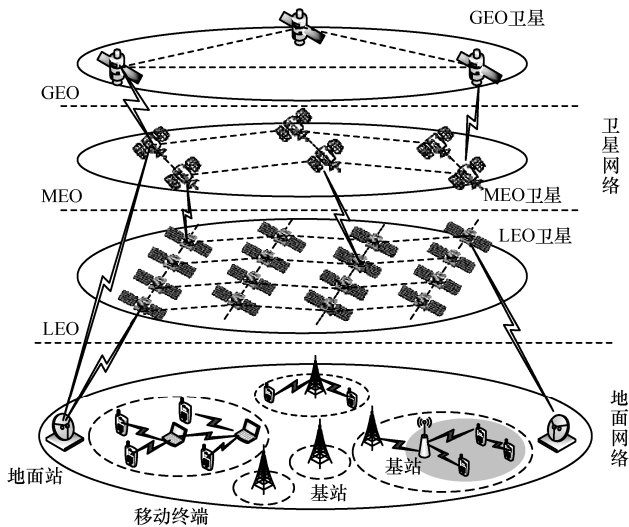


图 1 星地协同网络系统架构

① LEO/MEO 卫星。一方面, LEO/MEO 卫星构成空间接入网络, 并向地面用户提供无线访问权限, 以获得长距离全球通信。另一方面, LEO/MEO 卫星可以充当中继网络提供用于数据传输的中继服务。需要注意的是, 与移动蜂窝系统中的 eNode B 不同, LEO/MEO 卫星的能量供应和计算能力非常有限, 因此, 在小规模星座以及微型 LEO 卫星中, 执行高能耗或计算密集型的任务可能不切实际。

② GEO 卫星。对于星地协同网络, GEO 卫星网络在中继 LEO 或 MEO 卫星网络的数据方面起着重要作用。但是, 随着用于卫星间通信的激光通信技术的发展, GEO 中继卫星不再是星地协同网络的必要部分。此外, 与星间通信相比, GEO 卫星中继可能会导致更高的时延。

2) 地面网络

地面网络主要由地面通信系统组成, 包括蜂窝网络、移动自组织网络 (MANET, mobile AD Hoc network)^[27]、全球微波接入互操作性 (WiMAX,

worldwide interoperability for microwave access)^[28]、无线局域网 (WLAN, wireless local area network) 等。蜂窝网络已经从 1G 演进到了 2G 和 3G, 经过了 4G 或 LTE-A (LTE-advanced)^[29], 目前正在向 5G 演进以支持各种服务。在标准化方面, 第三代合作伙伴计划 (3GPP, third generation partnership project) 也已经开发了一套针对蜂窝/移动网络的规范。地面网络的优点是能够为用户提供高数据速率, 缺点是农村和偏远地区的网络覆盖范围有限。

2.1.2 卫星网络与地面网络的比较

卫星网络与地面网络的比较如表 1 所示。由于 LEO 和 MEO 的旋转周期不同, 因此卫星通信的路由表会经常更改。卫星的传输方式主要是基于激光或微波传输, 因此卫星传输易受环境影响, 从而导致干扰和时延现象的发生。此外, 卫星与地面之间的距离越大, 传输等待时间就越高。将卫星网络与地面网络进行比较, 卫星网络的路由机制不稳定且不固定, 而地面网络具有较大的带宽、完整的骨干网和成熟的路由机制; 卫星网络可以提供全球无缝覆盖范围, 但传输时延较长, 而地面网络具有较低的传输时延, 但易遭受自然灾害或人为基础设施破坏的影响。因此, 卫星网络和地面网络各有其优势和劣势, 如何有效地整合卫星网络和地面网络的通信, 保证用户日益增长的服务质量 (QoS, quality of service) 需求, 是未来的一个重要发展方向, 同时也存在许多挑战。

2.2 MEC 概述

作为移动网络的重要技术之一, 移动边缘计算在当前的网络发展过程中发挥着越来越重要的作用。本节首先对 MEC 的标准化进行介绍, 然后对 MEC 的体系架构进行简要的概述。

2.2.1 MEC 标准化

欧洲电信标准协会 (ETSI, European Telecommunication Standards Institute) 于 2014 年首次提出了移动边缘计算的概念, 将其定义为“在移动网

表 1 卫星网络与地面网络的比较

比较项目	种类	高度/km	时延/ms	移动性	路由	传输技术	通信协议	计算效率	覆盖范围	通信代价	发展时间	环境	优势	劣势
卫星网络	LEO	200~3 000	15	快		激光、微波	DTN	低	大	高	短	太空、航空	服务覆盖范围广、广播/多播	高传输时延、能力受限、高移动性
	MEO	3 000	100	较快	动态									
	GEO	35 786	250	对地静止	静态									
地面网络	光纤	无	5	静止	静态	微波、光纤	TCP/IP	高	小	低	长	航空、海洋、陆地	资源丰富、高吞吐量	服务覆盖范围受限、易受自然灾害影响
	5G	无	约 1	静止										

络的边缘提供 IT 服务环境和云计算能力”。随着研究的深入，ETSI 进一步扩展了 MEC 中“M”的定义，它不仅限于移动接入，而且包括其他非 3GPP 接入方法，例如 Wi-Fi 接入和固定接入。因此，“M”被重新定义为“Multi-Access”，移动边缘计算的概念也被扩展为多接入边缘计算^[19]。MEC 可视为在网络边缘运行的一种云服务平台，能够支持业务处理与资源调度功能的部署，实现服务性能和用户体验的改善，并在一定程度上减少回传链路的数据传输和核心网的带宽压力^[30]。

ETSI 除了包括 MEC 应用实现和应用程序接口 (API, application program interface) 等方面的工作外，还开展了很多相关工作来推进 MEC 的标准化进程，以及一些非 3GPP 和 5G 网络的标准化支持工作。除了 ETSI，3GPP 还做了一些工作来规范移动网络中 MEC 的使用。在 ME23.799 和 TR23.501 中，MEC 被认为是 5G 网络架构的关键技术之一。因此，其在会话管理、有效的用户平面选择和 QoS 框架、计费以及网络能力开放等方面的应用得到了产学研各界的重点研究和讨论^[31]。

2.2.2 MEC 的体系架构

图 2 描绘了一个详细的 MEC 参考体系架构^[32]，该架构由 ETSI 提出，详细定义了各个功能实体之间的相互关联。由图 2 可知，MEC 可以直接通过用

户终端应用程序为用户服务，也可以通过面向客户的服务 (CFS, customer facing service) 门户来为第三方客户提供服务。用户终端和 CFS 门户都通过 MEC 系统级管理与 MEC 系统交互。

移动边缘用户可以通过 MEC 系统级管理的用户应用生命周期管理代理来对相关应用和服务进行实例化、终止或重新定位。然后，操作支持系统 (OSS, operation support system) 决定是否批准相关请求，被批准的请求将转发到移动边缘编排器。移动边缘编排器是 MEC 系统级管理中的核心功能，它维护可用计算/存储/网络资源和 MEC 服务的总体视图。移动边缘编排器根据应用程序需求 (例如时延) 将虚拟化 MEC 资源分配给即将启动的应用程序。此外，编排器还可以灵活地将可用资源向下/向上扩展到已运行的应用程序。

MEC 系统级管理与构成移动边缘平台和虚拟化平台管理器的 MEC 服务器级管理互连。前者负责管理应用程序的生命周期、应用程序规则和服务授权、流量规则等；后者负责分配、管理和释放 MEC 服务器内的虚拟化基础设施提供的虚拟化计算、存储资源。MEC 服务器是参考体系架构的一个重要组成部分，它代表虚拟化的资源，并在虚拟化基础结构之上承载作为虚拟机运行的 MEC 应用程序。

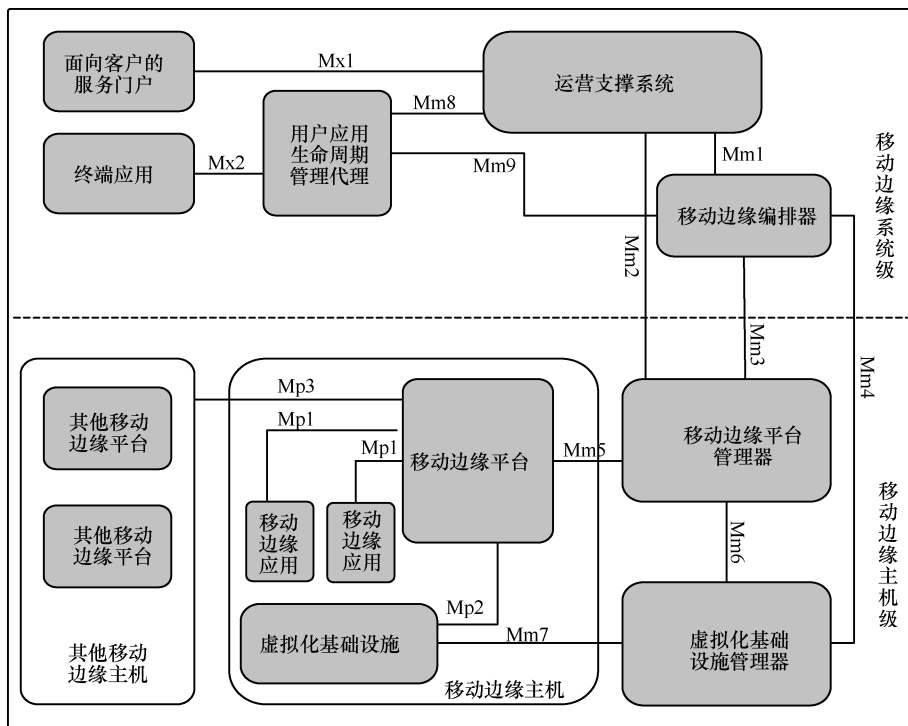


图 2 MEC 参考体系架构

2.3 在星地协同网络中引入 MEC 的动机

尽管星地协同网络的潜力巨大,但面临诸多挑战,可能会限制其广泛应用。星地协同网络面临用户不断提高的 QoS 需求的挑战,如高数据速率、低通信时延和处理能耗等。尤其是近几年,随着智能终端的快速发展,涌现了许多新的计算和能源密集型应用,如语音识别、游戏、多媒体编码/解码和智能交通等。虽然云计算可以用来完成这些任务,但是它受到广域网中不可靠的数据传输时延或时延抖动的影响^[33],无法满足用户对 QoS 的需求。此外,星地协同网络还面临可伸缩性、安全性和可靠性等挑战。引入边缘计算可有效应对上述挑战,已成为未来重要的发展趋势。接下来,本文从终端用户和运营商的角度分别对在星地协同网络中引入边缘计算的动机展开分析和探讨,为之后的融合工作介绍和讨论提供依据。具体来说,从用户终端角度引入 MEC 的动机主要是进一步满足用户的 QoS 需求和降低终端的能耗,从运营商角度主要是进一步降低核心网流量、提高网络的可伸缩性和安全性。接下来,本文将分别对这些动机展开讨论。

1) 实时 QoS 保障

随着智能终端的快速发展,其性能也在不断地提高和完善,但大多数智能终端仍然缺乏足够的性能来完成具有预定义 QoS 需求的实时用例。通过计算卸载,将计算任务通过卫星卸载到云服务器,可以有效满足容量有限的终端设备的计算需求。然而,各种新兴业务应用的快速发展,如物联网、自动驾驶、4K/8K 视频传输等,对星地协同网络提出了诸如超低时延、高 QoS 保障等新的需求。例如,在自动驾驶场景,集成到自主车辆中的摄像机生成的数据需要实时处理,以确定瞬间所需的驾驶动作。对于这类对时延敏感的应用,传统的云计算卸载并不是一种很好的解决方案,因为通过广域网访问它们时会造成较高的时延。在这种情况下,边缘计算通过在网络边缘满足为用户提供就近的计算、存储能力,被认为是应对这种挑战的有效手段。通过边缘计算,用户的计算需求可以直接在边缘服务器得到处理而不需要传输到远程云服务器,从而大大降低了任务的处理时延,提高了用户的体验质量。文献[34]的研究表明,与云计算相比,基于边缘计算的卸载方案在处理物联网数据时可有效降低时延,保障用户 QoS 需求。

2) 能耗优化

在考虑移动设备时,能耗是最重要的参数之一。虽然智能终端的处理能力在稳步提高,但电池寿命并没有以期望的速度提高。随着各种计算密集型应用的发展,在设备本身上执行这些应用程序会导致非常高的能耗。在这种情况下,尽管将计算任务卸载到云服务器可以在一定程度上降低移动设备处理计算任务的计算能耗,但是由于云服务器通常建立在距离移动终端非常远的地方,移动设备用于传输任务的传输能耗也会随之提高。因此,在星地协同网络中引入边缘计算,将计算任务卸载到距离用户更近的网络边缘,有助于进一步降低移动设备的能耗。文献[35]对诸如人脸识别和增强现实等应用的能耗进行了分析,研究结果表明,与云服务器相比,将任务卸载到边缘服务器可以有效地降低设备终端的能耗。因此,边缘计算的引入对星地协同网络中电池能量有限的移动设备是非常必要的。

3) 核心网流量调度

核心网带宽有限,易受拥塞影响。根据 Cisco 公司最新发布的预测报告,到 2021 年,全球设备的总量将达到 750 亿,而移动流量将超过 24.3 EB/月^[36]。因此,运营商在管理具有不同大小和特征的累积数据流量时面临巨大挑战。在传统星地协同网络中,移动设备产生的流量通过卫星或其他接入设备接入核心网络并进一步访问云服务器。如果这些业务能够在星地协同网络边缘被满足,则可以大大减轻核心网络的负担,并且优化带宽利用率。网络的这种转变防止了边缘数十亿设备消耗核心网络的有限带宽,因此,核心网络所负责的业务在规模上变得可管理,并且简化了操作。不仅是网络运营商,云服务提供商也面临同样的挑战。例如,如果物联网传感器(如摄像机)生成的数据在网络边缘进行处理,那么云数据中心对计算资源的需求就会降低。因此,边缘计算的引入可有效解决核心网和数据中心的拥塞问题。

4) 可伸缩性

终端设备的数量预计将在几年内达到数万亿,因此,可伸缩性问题是星地协同网络面临的重大挑战之一^[37]。为了支持这些实时变化的动态需求,可以相应地缩放云。然而,向云服务器发送大量数据会在数据中心内造成拥塞。并且由于终端设备产生的数据流量不断发生变化,也使运营商的工作变得

更加困难。在这种情况下，云计算的集中式结构无法为数据和应用程序提供一个可伸缩的环境。在星地协同网络中引入边缘计算，在边缘服务器上以虚拟机 (VM, virtual machine) 的形式分发服务和应用程序并进行复制，可极大地提高整个系统的可伸缩性^[38]。如果边缘服务器变得拥挤并且无法满足传入的请求，则可以将相应的服务复制到附近的另一个边缘服务器上，并允许对请求进行进一步的处理。此外，通过边缘计算可以对星地协同网络边缘的数据进行预处理，从而可以极大地降低转发给云服务器的流量，减轻云的可伸缩性负担。

5) 安全性和可靠性

在星地协同网络中，如果所有数据都传回主服务器，则操作过程和数据都极易受到攻击。分布式的边缘计算将在不同的数据中心和设备之间分配数据处理工作。因此，攻击者无法通过攻击一台设备来影响整个网络。如果数据是在本地存储和分析的，那么安全团队可以轻松地对其进行监视，从而大大提高整个系统的安全性。此外，与云计算相比，边缘计算提供了更好的可靠性。边缘计算服务器部署在更靠近用户的位置，因此，网络中断的可能性大大降低了。

2.4 MEC 部署

相较于地面网络，星地网络中 MEC 拥有更多的部署位置选择，以适应不同的需求。然而，由于星地网络场景的各种限制条件，部署也存在许多需要解决的问题。本节首先介绍了 MEC 部署位置，然后针对部署中存在的问题进行了说明。

2.4.1 MEC 部署位置

MEC 是一种开放式体系结构和平台，可以灵活地部署在不同的位置，以满足不同的服务和需求。在星地协同网络中，MEC 的部署位置通常可以分为以下几种类型。

1) 部署于地面网络基站侧

MEC 服务器可以部署在用户附近的地面基站侧，这种部署方式与常规 MEC 非常相似，计算任务可以直接卸载到用户附近基站的 MEC，任务可以实现就近处理，大大减少了等待时间。此外，整个星地网络的流量也将得到缓解。但是，这种部署方式要求用户附近存在可用基站，更适用于密集用户场景。对于通过地面终端站连接到卫星的稀疏用户场景，这种部署方式并不适用，因为地面终端站没有额外的计算能力。而且，为一小群用户部署这种

专用的 MEC 服务器在经济上也是不可行的。

2) 部署于低轨卫星

MEC 服务器也可以部署在 LEO 卫星中。在这种情况下，卫星覆盖范围内的所有地面设备都可以受益于卸载服务。卫星和地面骨干网之间的流量也减少了。与部署于地面基站侧相比，此方案的时延相对较高，但是与将请求发送到远程云相比，它在时延方面仍然有重大改进。该部署方案的缺点在于，进行密集的计算将大大增加卫星的能耗，当严格限制卫星的能量供应时，计算卸载功能将会受到很大的限制。

3) 部署于地面站网关

将 MEC 服务器部署在地面站网关中，能够为更多的用户提供计算能力更强的服务。如果在地面站网关中部署了 MEC 服务器，则所有域用户都可以享受 MEC 服务，从而避免了地面站网关和远程云之间的大量数据传输。与上述卸载方式相比，由于 LEO 卫星链路的额外中继，此种部署方式导致服务的时延相对较高，但在实施和维护方面更实用。

2.4.2 部署存在的问题

在星地网络中，考虑到卫星的高移动性、能耗受限以及不同服务需求的问题，部署 MEC 需要对以下问题加以考量。

1) 卫星高移动性

卫星网络不同于地面网络，卫星网络中的卫星都处于周期性的高速运动过程中。将 MEC 部署于卫星上，计算卸载到卫星上后，在卫星高速运动过程中，如何保障服务的连续性是必须考虑的问题。因此，必须设计合理的移动性管理方案，对计算卸载的服务连续性进行保障。

2) 卫星能耗受限

卫星体积较小，电池受限，这就导致在卫星上部署 MEC 必须要考虑能耗的问题。针对此，考虑采用 Docker 容器的轻量级部署方式，可减少部署的能耗。此外，在计算卸载过程中，相邻的卫星之间进行协作卸载，也可有效减轻单个卫星的能耗，并能有效提升卫星网络的资源利用效率。

3) 不同服务需求

考虑到不同服务对时延有不同的需求，MEC 的部署也需要根据不同的场景进行调整。若用户对时延要求较高，MEC 应该部署于更靠近用户的位置，如地面站、卫星等；若计算服务对时延需求不

大,但需要很高的计算处理能力,则需要考虑网关等计算资源丰富的部署地点。

3 融合 MEC 的星地协同网络架构

本节首先对融合 MEC 的星地协同网络的架构设计相关研究现状进行了介绍和梳理。然后结合当前相关工作,对融合 MEC 的星地协同网络的体系架构进行了概述,此外,还介绍了该架构的一些支撑关键技术和适用的一些典型应用。

3.1 相关工作介绍

融合 MEC 的星地协同网络已成为当前研究的热点问题之一。国内外很多研究学者都已经开展了相关工作,对融合网络架构展开了研究。具体来说,当前架构设计的相关研究工作可以分为 2 类,即以用户体验质量为优化目标的融合架构设计和以网络性能为优化目标的融合架构设计。以用户体验质量为优化目标的相关工作又可以进一步分为以降低时延和以降低时延和能耗为优化目标 2 类。接下来,将对这些相关研究工作展开详细的介绍和讨论。

在以降低时延为优化目标的融合架构设计方面,文献[39]提出了面向 5G 卫星网络的一种灵活的网络切片技术,并结合软件定义网络(SDN, software defined network)和网络功能虚拟化(NFV, network functions virtualization)技术,设计了基于卫星网络的边缘计算系统架构和资源管理机制。该机制可以根据应用场景和业务需求的不同,基于不同的 QoS 需求分配资源。仿真结果表明,提出的架构可满足不同的带宽和计算资源需求,有效减少时延。由于当前的机载处理能力和卫星间通信速率的限制,从卫星获取数据的时延较高,数据利用率较低。为了智能地使用卫星物联网,文献[40]提出了一种面向 5G/6G 的卫星物联网边缘智能计算架构,并分析了边缘计算和深度学习如何在卫星物联网图像数据目标检测中发挥作用。仿真结果表明,边缘智能计算可以有效减少卫星传输的数据量、数据处理和通信时延,提高星际链路的带宽利用率,减轻卫星地面站数据处理的压力。

在以降低时延和能耗为优化目标的融合架构设计方面,文献[25]提出了一种面向高速星地协同网络的卫星 MEC 集成架构,并提出了一种动态 NFV 技术,以将计算资源整合到 LEO 卫星的覆盖范围内。此外,该还提出了一种面向 QoS 保障的

任务调度模型,以有效降低用户感知的时延和系统能耗。文献[41]提出了一种空地融合网络边缘/云计算架构,该架构可在考虑远程能源和计算约束的情况下减轻计算密集型应用的负担,其中无人机提供靠近用户的边缘计算,而卫星提供对云计算的访问支持。此外,该还提出了一种联合资源分配和任务调度方法,以有效地将计算资源分配给 VM 并调度卸载的任务。

在以提高系统性能为优化目标的融合架构设计方面,文献[42]提出了一种软件定义的星地协同组网体系架构,该架构不仅集成了卫星网络和地面网络,还利用软件定义网络和移动边缘计算来提供多样化通信服务。这不仅提升了网络管理的灵活性,还提高了全球多媒体服务的质量。文献[43]提出了一种面向智慧城市的星地协同雾计算架构以提高用户的体验质量,利用车联网中资源较丰富的车载设备来缓解由于用户需求动态变化导致的计算资源需求地理不平衡问题。此外,该还提出了一种通过资源定价影响车辆路径选择的激励方案,以平衡资源需求并基于地理分配计算资源。

本节从优化目标的角度对目前的融合架构方案进行了详细的分析,如表 2 所示。在各个方案中,大多数的架构在考虑融合边缘计算时,仍然考虑边缘计算部署在地面网络,将卫星作为接入边缘计算资源的接入节点。也有一些设计方案(如文献[39, 43])考虑将边缘计算直接部署在卫星上,为用户提供更快速的计算响应和更高质量的服务。但是这些研究只给出了融合的基本模型,并对特定的技术进行了研究,缺少对总体架构的细致设计。因此,本文总结当前的研究工作,提出了一种融合 MEC 的星地协同网络的综合体系架构。

3.2 融合架构概述

图 3 显示了融合 MEC 的星地协同网络架构,该架构由以下几个部分组成。

1) 卫星网络

卫星网络主要由低轨卫星网络组成,与移动蜂窝系统中的 eNode B 不同,低轨卫星的能量供应和计算能力非常有限,因此,在小规模的低轨卫星网络中,可能无法处理高能耗或计算密集型的计算任务。这里需要注意的是,卫星网络中并不只包括低轨卫星,例如, O3b 网络运行的中轨卫星星座可为数据传输提供中继服务,但由于没有利用到相关的功能,因此在本架构中不做考虑。

表 2 融合 MEC 的星地协同网络架构设计相关研究工作总结归类

优化目标	文献	主要贡献	支撑技术	应用场景
以降低时延为优化目标	文献[39]	提出了一种基于空间的云-雾卫星网络切片架构,并结合 SDN/NFV 技术设计了一种资源管理机制,以使网络切片更加灵活	网络切片 SDN/NFV	5G
	文献[40]	提出了一种卫星物联网边缘智能计算架构,并分析了边缘计算和人工智能在图像数据目标检测中的作用	人工智能	5G/6G、 物联网
以降低时延和能耗为优化目标	文献[25]	提出了一种融合 MEC 的星地协同网络架构以提高用户的 QoS,并提出了一种协同任务调度方案以降低用户感知的时延和系统能耗	NFV	5G
	文献[41]	提出了一种面向物联网的星地协同边缘组网架构,并提出了一种联合资源分配和计算卸载方案	云计算	物联网
以提高系统性能为优化目标	文献[42]	提出了一种软件定义的星地协同组网体系结构,并提出了一种基于边缘计算的网路优化方案以提高网络管理灵活性	SDN/NFV	5G
	文献[43]	提出了一种面向智慧城市的星地协同雾计算架构,并设计了一种资源定价的激励方案,以平衡网络资源分配	雾计算	车联网、 物联网

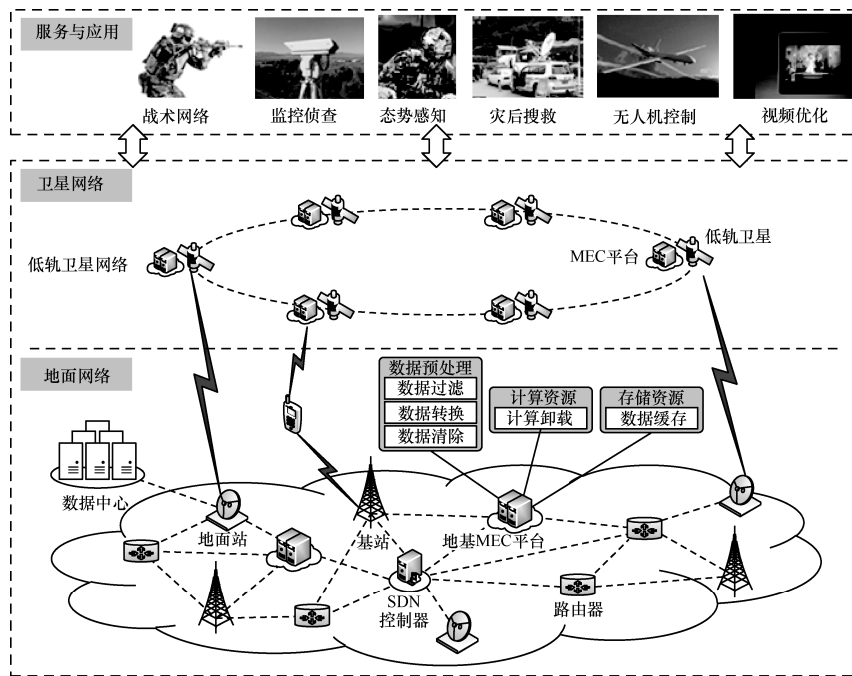


图 3 融合 MEC 的星地协同网络架构

2) 地面网络

地面网络主要包括地面站和地面骨干网。

①地面站。在星地协同网络中,有地面网关站和地面终端站 2 种类型的地面站。地面网关站应该配备强大的定向天线,并且能够支持大量用户,如蜂窝网络或区域 IP 网络。相反,地面终端站的天线没有那么强大,它只为一小部分用户(如家庭或学校)传输数据。

②地面骨干网。地面骨干网主要包括 MEC 平

台、数据中心、SDN 控制器以及用于网络接入和路由的各种设备。地面骨干网通过蜂窝网络与用户设备通信,通过雷达接收卫星计算任务。数据中心具有较丰富的计算和存储资源,可以处理网络中各种用户设备生成的计算任务。SDN 控制器负责网络的路由转发及流量控制,提供网络的统一管理 with 编排功能。一个星地协同网络的广域地面区域的总流量以地面骨干网为单位进行聚合。需要注意的是,一个星地协同网络可能在地面上有几个地面骨干网。

3) 用户设备

用户设备指星地协同网络中的移动设备, 例如智能手机、AR/VR 设备和智能车辆等。这些设备的计算能力有限, 因此它们生成的计算任务可能需要卸载到星地协同网络来进行处理。

根据使用人群密度的不同, 融合 MEC 的星地协同网络架构的应用场景主要分为密集型用户场景和稀疏型用户场景。在密集型用户场景下, 对于移动用户, 4G/5G 服务可以通过部署蜂窝塔和 eNode B 来构建地面蜂窝网络, 计算任务可以就近卸载到基站侧的 MEC 平台进行处理, 不需要通过蜂窝网络传输至数据中心进行处理。在稀疏用户场景下, 用户可能分布在高空平台、飞机、孤岛、农村等区域。在这些情况下, 地面蜂窝移动网络无法覆盖, 并且用户终端的通信、计算、缓存和存储容量都非常有限。因此, 这些用户终端可以通过卫星进行通信, 直接将其计算任务卸载到卫星上, 或者通过卫星中继将其计算任务卸载到地面数据中心进行任务处理。

在提出的架构中, 典型的任务处理流程如下。用户生成计算任务, 首先判断本地的计算资源是否能满足其需求, 如果本地计算资源无法满足用户需求, 则根据所处环境决定将其卸载到卫星网络中的边缘计算节点还是地面网络的边缘计算节点。当相应的边缘计算节点接收到计算任务时, 如果处于繁忙状态, 则将计算任务发送到数据中心进行处理; 否则, 它将根据自己的计算能力决定是否与周围的边缘计算节点合作来处理计算任务, 这取决于边缘计算网络的协同任务调度策略。当任务处理完成后, 将结果返回到用户设备或数据中心取决于任务的类型。总的来说, 整个网络架构通过将计算资源部署到更靠近用户的星地协同网络, 大大缩短了服务响应时间, 并且边缘计算节点之间的协作进一步加快了任务处理速度, 提高了用户服务体验。

3.3 关键技术

本节对融合 MEC 的星地协同网络架构中的几种关键支撑技术展开探讨, 包括软件定义网络技术、动态网络功能虚拟化技术等。然后对在融合网络中运用这些技术时存在的问题以及解决方案展开了分析和讨论。

3.3.1 软件定义网络技术

SDN 作为一种新兴的网络架构, 能够有效帮助设计动态、可管理的网络。SDN 通过将控制平面和

数据平面分离, 在基础网络设备中只保留相应的数据转发功能, 在控制平面上进行控制功能的集成, 通过控制器实现对网络设备的统一控制。控制器拥有对整个网络的控制能力, 通过下发相应的策略命令控制节点进行转发等功能。SDN 控制器具有网络资源的全局视图, 并根据网络的动态性和服务的 QoS 要求, 对网络资源进行实时的逻辑分配。通过对控制器的全面管理, 可以实现网络的链路发现、拓扑控制等功能。因此, 从全局的角度来看, SDN 有助于网络管理, 并通过开放接口支持可编程性, 可以实现一个适应性强、效率高、可管理、成本效益高的网络^[44]。

SDN 在融合 MEC 的星地协同网络中部署的逻辑结构如图 4 所示。基础设施层由一些物理资源组成, 包括卫星域和地面域中的通信、存储和计算资源。它们构成了向用户提供无缝通信的网络基础设施。在抽象层, 利用 NFV 技术对物理资源进行抽象, 将虚拟化的资源集中起来, 为 SDN 控制器提供网络资源的全局视图。在控制层, 位于地面的 SDN 控制器使用南向接口与卫星和地面的物理网络元件进行通信。应用层由多个星地协同网络的服务和网络管理模块(如移动性管理、流量工程、路由、远程配置、安全)组成, 通过控制层提供的北向接口实现。基于此架构, SDN 控制器可以实现对融合 MEC 的星地协同网络中的 MEC 应用程序进行有效控制, 有效保障融合 MEC 的星地协同网络中应用服务的 QoS 需求。

3.3.2 动态网络功能虚拟化技术

NFV 是一种操作框架, 旨在编排在自动化虚拟基础架构的商用现成品(COTS, commercial off-the-shelf)硬件中部署的虚拟化网络功能(VNF, virtualized network function)软件设备, 并进行 VNF 设备的全生命周期管理。通过采用 NFV 技术统一可用资源, 可使融合 MEC 的星地协同网络集中管理计算卸载任务。此外, NFV 在降低融合 MEC 的星地协同网络中为网络供应商部署新服务的成本和时间方面具有巨大优势^[45]。然而, 在融合 MEC 的星地协同网络中, 所有的低轨卫星都处于高速运动状态。在这种情况下, 卫星覆盖范围内的边缘计算服务器总是在变化, 实现静态 NFV 统一融合 MEC 的星地协同网络中的服务器是困难的, 甚至是不切实际的。

因此, 使用动态 NFV 技术来整合融合 MEC 的

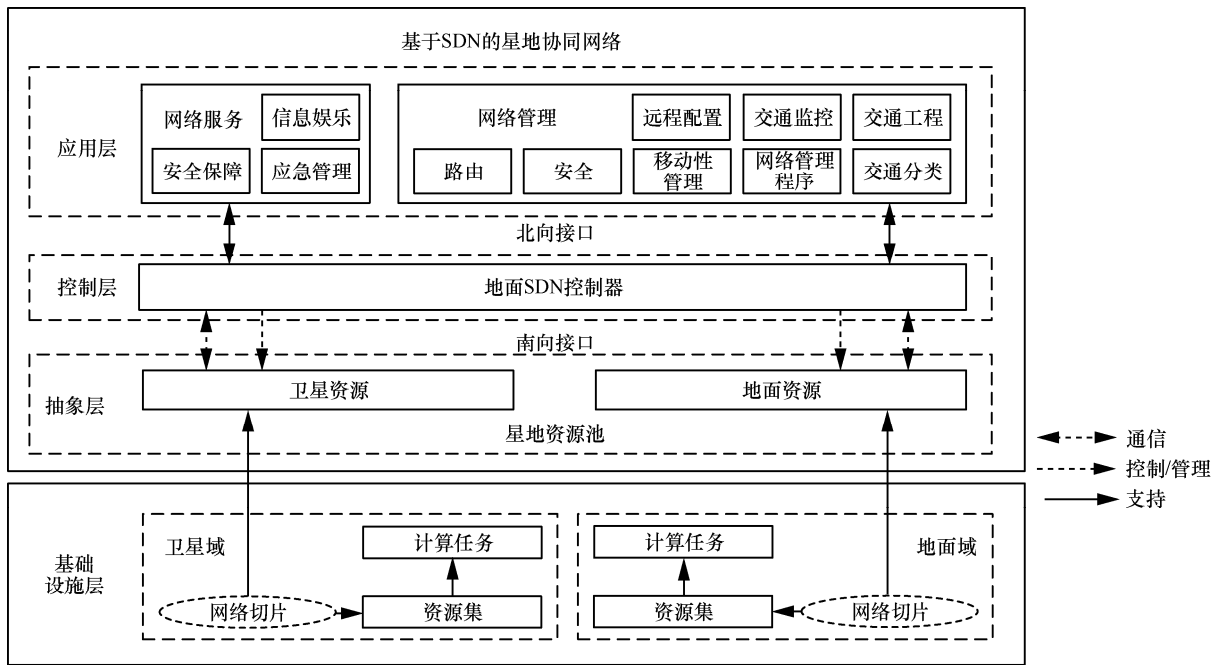


图 4 SDN 在融合 MEC 的星地协同网络中部署的逻辑结构

星地协同网络^[25]的资源是非常有必要的，如图 5 所示。动态虚拟化系统类似于常用的静态 NFV 系统，包含 3 层：虚拟化基础设施层、虚拟化网络功能层和编排层。为了解决低轨卫星的机动性问题，在卫星编排器中增加了一个动态资源监视器。这样，监视器就知道 VNF 是连接状态还是断开状态，资源注册和删除操作可以在编排器中快速完成。此外，当可用资源发生变化时，信息将被发送到用户和 MEC 服务器以调整其策略。

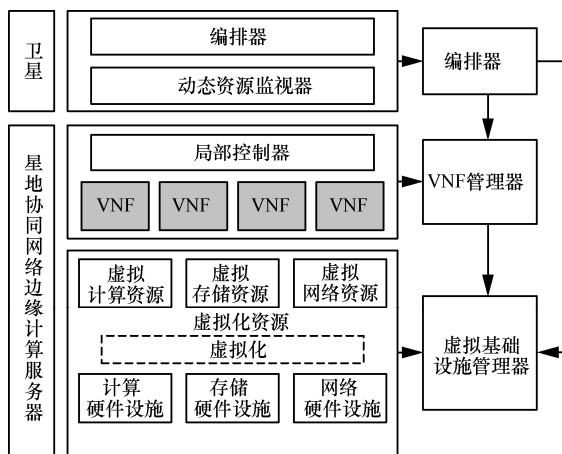


图 5 融合 MEC 的星地协同网络中的动态 NFV

3.3.3 技术问题与解决方案

在融合 MEC 的星地协同网络中引入诸如 SDN、NFV 等新型技术在进一步增强融合网络的管

控能力的同时，也带来了一些挑战。接下来，本文对这些挑战及其解决方案展开详细的分析和讨论。

1) 路由策略

随着融合网络规模的扩大，支持 SDN 的转发设备中出现了大量的流表，消耗了大量的存储和计算资源。因此，可以将互联网上开发的自治系统的概念引入融合网络中，以简化网络结构，方便网络管理。此外，可以在每个自治系统中使用私有路由来减少融合网络中路由的复杂性。随着人工智能技术的发展，基于人工智能的动态网络路由策略成为未来的发展趋势。

2) 资源管理与分配

通过 SDN 和 NFV 技术的引入，可以抽象出融合网络中的各种基础设施、频谱、通信信道以及计算资源和存储资源，以构建多维的天地一体化资源。此外，在中间盒中耦合的各种网络功能也可以抽象为使用 NFV 技术在 SDN 控制器中实现的 VNF 资源^[46]。这些虚拟化资源被汇集在一起提供网络资源的全局信息。在此基础上，如何优化系统的资源利用率是一个具有挑战性的课题。无线资源管理可以在边缘计算服务器中进行编排，其他虚拟资源则由网络控制器统一编排。高效的资源编排不仅将所需的 VNF 连接起来，还将虚拟网络资源分割成独立的片，并将它们分布在多个虚拟运营商之间。在设计灵活动态的资源分配策略时，应考虑每个段的

特殊性（特别是高度动态的网络拓扑、可预测性、规律性和周期性的空间网络）和每个虚拟网络的 QoS 需求。

3) 安全性

在融合网络中，转发设备可能经常与 SDN 控制器连接或断开连接。因此，分组传输容易被截获和中断。由于融合网络具有高动态性、高误比特率、大传输时延和有限的计算能力，因此需要一种轻量的安全解决方案来解决引入 SDN 技术融合网络的安全问题。计算开销低的加密方案可以用于认证，从而降低对网络处理资源的要求。利用网络拓扑的可预测性，提前协商会话密钥，可以实现流连接时延的降低。由于软件缺陷和错误配置，在软件中实现的 VNF 比硬件中间盒更容易受到攻击。网络控制器作为支持 SDN 融合网络的核心部件，负责网络的控制和管理，因此，如何保障网络控制器的安全性也至关重要。

3.4 典型应用

融合 MEC 的星地协同网络可以在网络边缘为用户设备提供广泛的计算能力和存储能力，从而促进一些应用的发展和性能提升，一些典型的应用场景总结如下。

1) 空中数据回传

融合 MEC 的星地协同网络为低轨卫星和地面基础设施之间的数据通信提供了低时延的空中数据回传。在用户密度低、缺乏通信基础设施的偏远地区，“无线局域网”的重要性日益提高。在这种情况下，不需要地面基础设施即可建立与卫星的通信连接。即使在具有地面基础设施的区域，融合 MEC 的星地协同网络也可以用作备用回程，以缓解地面网络的拥塞。在可能危及地面基础设施的紧急情况下，融合 MEC 的星地协同网络在确保关键通信的连续性方面也十分有效。

2) 监视/侦查

在未部署 MEC 的星地协同网络中，一些监视或侦查服务都要求卫星将图像返回到地面的数据中心进行处理，这将导致这些服务的传输能耗高、传输时延大。借助 MEC 的边缘计算能力，在融合 MEC 的星地协同网络中（如图 6 所示），卫星 MEC 平台处可以直接完成图像的识别和处理，卫星只需要返回图像的关键部分或报警信息，而不需要返回所有的观测结果。此外，这种侦察能力特别适合在地质条件不稳定的地区使用，其中对建筑物、道路

和桥梁的监视至关重要。在发生灾害的情况下，融合网络还可以用于监视环境状态。

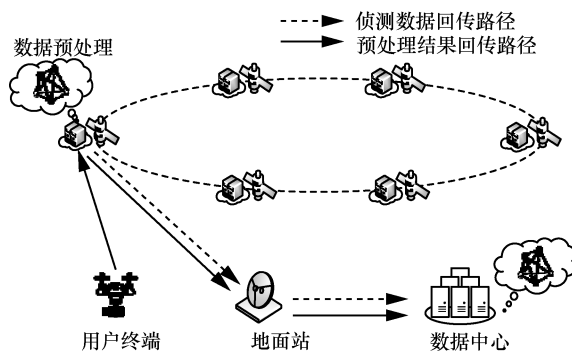


图 6 融合 MEC 的星地协同网络监视/侦查服务示意

3) 视频优化

通过边缘缓存可以在卫星的 MEC 平台上缓存一些流行的视频内容，如图 7 所示。当用户访问视频内容时，通过部署在卫星上的 MEC 平台可以对视频数据分组进行深入分析，并将其与本地缓存的内容进行比较。如果用户访问的视频内容已经缓存在本地，则可以直接在卫星处响应用户的视频请求，而不需要将用户的视频内容请求发送至位于地面的远端内容提供商，从而大大减少了冗余数据回传带来的高时延和能量消耗，降低了地面核心网络压力，提升了用户的视频体验质量。

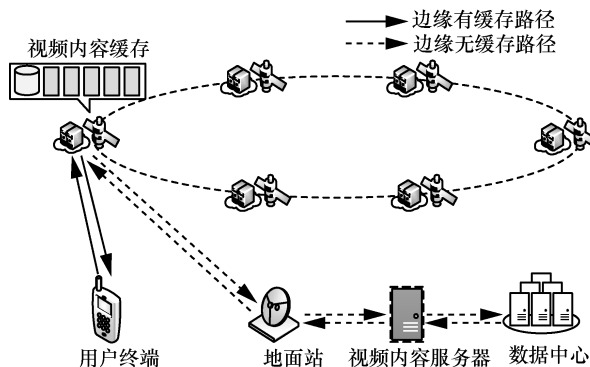


图 7 融合 MEC 的星地协同网络视频优化服务示意

4 关键挑战

融合 MEC 的星地协同网络架构为提高网络性能和用户体验质量带来各种好处。同时，星地协同网络中 MEC 的引入也带来了新的关键技术研究问题和挑战，如任务调度、移动性管理、干扰管理和异构性支持等，本节将对此进行讨论。

4.1 任务调度

任务调度通过任务调配，实现网络和系统各种资源的有效利用，保障网络系统性能。因此其一直以来是人们关注的重点研究课题之一。本节首先对星地协同网络、移动边缘计算及融合网络中任务调度的相关研究分别进行了介绍，然后针对融合 MEC 的星地协同网络中的任务调度方案展开了讨论。

4.1.1 相关工作进展研究

任务调度问题作为一个热点研究方向，许多学者对其从多个方面进行了相关研究。本节分别对星地协同网络、移动边缘计算和融合网络 3 个方面的相关研究进行了整理，从优化目标的角度对相关研究进行了详细的归纳和分析。

1) 星地协同网络中的任务调度

星地协同网络中的任务调度主要通过卫星或无人机的控制功能实现任务调度、资源分配和网络优化。文献[47]提出了一个多无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 使能的 D2D 卫星网络架构以支持网络中的内容共享和交付。此外，该文设计了一个任务调度方案，通过优化每个飞行周期中的无人机轨迹，以满足用户的速率要求，使无人机服务的边缘用户的总速率最大。文献[48]聚焦多 UAV 轨迹优化的数据卸载场景，提出了一种迭代算法，以最大化无人机辅助蜂窝网络中的数据吞吐量。文献[49]提出了一种利用卫星链路在 5G 卫星融合网络中进行多媒体流量卸载的子分组方法，该方法旨在通过单个标记来衡量多播无线电资源管理策略的整体性能，以提高信道和聚合数据速率。

2) 移动边缘计算中的任务调度

移动边缘计算中，任务调度主要通过卸载决策的优化以保障用户终端或应用程序的时延和能耗需求。文献[50]引入了混合光纤无线网络，为集中式云和移动边缘计算的共存提供支持。此外，该文研究了云-边缘协同计算卸载问题，并提出了 2 种方案，即近似协同的计算卸载方案和基于博弈论的协同计算卸载方案。文献[51]研究了带有小蜂窝网络的 MEC 系统中的节能计算卸载管理方案。通过共同优化计算分流决策、频谱、功率和计算资源分配来最大程度地减少用户的能耗。文献[52]研究了启用 MEC 的蜂窝异构网络中的计算卸载和单元选择策略问题，将其表述为任务执行等待时间最小化问题，并提出了一种广泛的搜索方法和

Khun-Munkres 算法以获得最优解。

3) 融合网络中的任务调度

MEC 与星地协同网络的融合，允许星地协同网络在网络边缘为用户提供计算服务，卫星强大的控制和连接能力为任务调度提供强大的技术支持。文献[25]设计了一种协同计算卸载方案，LEO 实现对资源的整合和分配，调度用户计算任务的卸载过程，实现时延和能耗的优化。文献[41]提出了一种面向空地边缘-云网络的联合资源分配和任务调度方案，以有效地进行资源分配并调度卸载的任务。此外，为了应对系统的动态性和复杂性，设计了一种基于深度强化学习的计算卸载算法来实时学习最佳卸载策略。

如表 3 所示，本节从优化目标的角度分别对星地协同网络、移动边缘计算和融合网络中的任务调度方案进行了调研和归纳。对于融合网络中的任务调度，在大多数的方案设计中，卫星仅充当通信和控制节点的角色，任务调度主要集中在对地面计算资源的调度上。然而考虑到 MEC 可以部署在卫星上的场景，设计一种针对卫星 MEC 计算节点的任务调度方案也是非常必要的。因此，本文将考虑卫星 MEC 计算节点场景的任务调度方案展开讨论和设计。

4.1.2 融合网络架构下的任务调度方案

在本文提出的融合网络架构下，计算资源存在于用户终端、边缘计算平台、数据中心等多层次计算平台中。因此，从用户终端角度出发，设计一种灵活动态的用户终端/边缘计算平台/远程数据中心的多层次协同卸载机制，可有效满足用户对于时延、能耗、隐私等不同体验质量 (QoE, quality of experience) 的需求。此外，在边缘计算系统接收到大量计算卸载任务时，由于单个边缘计算节点处资源受限，可能无法满足用户需求。在这种情况下，利用相邻的多个边缘计算节点处空闲的计算资源，进行多节点协作计算，可进一步提升计算性能与整体资源利用效率。

任务调度示意如图 8 所示，本节将从多层次协同计算卸载和多节点协同任务调度 2 个角度对融合网络中的任务调度问题展开讨论。

1) 多层次协同计算卸载

融合网络中的各类用户对不同任务有不同的计算需求，例如有些任务是时延敏感型任务，对于时延要求很高；有些任务是计算密集型任务，对于

表 3 任务调度研究方案总结归纳

场景	优化目标	文献	方案	技术方法
星地协同网络	吞吐量	文献[47]	提出了一个结合了无人机和 D2D 的网络架构 解决网络中的信道分配问题	基于分布式反协调博弈的 信道分配算法
		文献[48]	优化无人机航迹 满足所有用户的速率要求	迭代算法
	信道和聚合数据 速率	文献[49]	基于多播子分组最大满意度指数进行度量 利用卫星链路进行流量卸载	子分组方法
移动边缘计算	时延	文献[50]	解决了联合计算卸载和单元选择策略问题 提出了优化任务执行等待时间的调度方案	搜索方法和 Khun-Munkres 算法
	能耗	文献[51]	提出一种通过采用 FiWi 接入的网络架构 考虑移动终端的时延约束和信道约束	分布式博弈论算法
		文献[52]	优化计算卸载决策和资源分配 考虑计算卸载决策、功率控制和无线资源分配	基于粒子群算法的层次化 遗传算法
融合网络	时延和能耗	文献[25]	LEO 对资源进行整合和分配 调度用户计算任务卸载	协作计算卸载方法
		文献[41]	提出了一种联合资源分配和任务调度方法	启发式算法
			设计了基于深度强化学习的计算卸载算法	

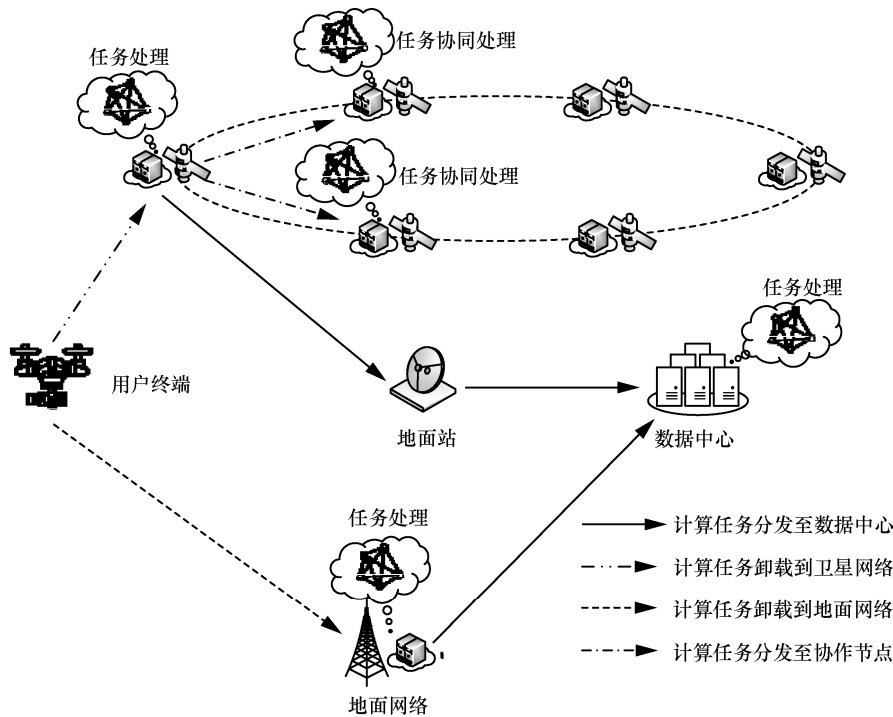


图 8 任务调度示意

时延没有过高要求，但要求用户终端能在较少的能耗范围内完成任务的处理。因此，根据用户对时延、能耗、吞吐量、带宽等不同 QoS 需求，结合各层次计算资源的不同特点，研究最优的本地/边缘/数据中心间的多层协同计算卸载是一个非常重要的技

术课题。

为此，本文设计了多层协同计算卸载决策过程，主要包含以下流程。

①用户与连接边缘计算节点（如低轨卫星边缘计算节点）进行交互，获取诸如链路状态信息、数

据队列信息等网络状态信息，并提交自身的任务请求信息。

②低轨卫星节点根据自身队列情况及剩余计算资源情况对用户计算请求进行反馈。

③用户根据自身的 QoE 需求（如对时延的需求）计算不同计算卸载情况下的任务处理时延，从而得出最优的计算卸载方案，选择是将部分或全部任务在本地进行处理或卸载。

④当边缘节点、数据中心处理完计算任务时，将处理结果反馈给用户终端，用户终端汇总整理计算结果数据。

2) 多节点协同任务调度

在卫星组网环境下，计算密集型任务可由用户终端卸载到地面网络和卫星网络实现计算下沉。考虑到单个边缘节点处资源受限，而不同节点间资源使用情况存在差异，进行多节点协同任务调度可实现任务高效处理和网络资源的高效利用。本方案以任务卸载到低轨卫星网络为例，针对单卫星节点资源受限无法满足用户计算需求的情况，从低轨卫星网络角度出发，研究星间的协同调度。此外，本方案针对网络能耗及带宽消耗进行优化，在满足用户 QoE 需求条件下，实现对融合网络性能的整体优化。

多节点协同任务调度流程如图 9 所示，本文所

设计的星间任务调度决策过程主要包含以下 3 个阶段。

① 信息交互。在此阶段，本地卫星边缘计算节点接收来自移动用户的任务卸载请求。然后，节点将以分布式的方式与相邻卫星边缘计算节点交互一些本地信息（包括队列长度、缓冲区大小、执行时间和能耗成本信息等）。

② 任务调度和分配。本地卫星边缘计算节点判断本地资源是否能满足当前计算请求，若能够满足，则直接在本地完成任务处理；若不能满足，则向相邻卫星边缘计算节点发送协同计算请求，请求其协助计算。相邻节点根据自身情况判断是否接收协助请求，如接收则将自身状态信息（如资源使用情况、处理能力等）反馈给本地节点。本地节点根据相邻节点反馈的信息进行任务分配以最小化计算任务的总处理时延，并分发任务到相应的邻居边缘节点。如果本地节点判断整个低轨卫星网络都无法满足当前计算需求，则本地节点将计算任务卸载到地面数据中心，从而以更高的时延和能量消耗进行远程任务处理。

③ 任务处理和结果反馈。相邻卫星的边缘计算节点接收并处理任务，然后将获得的结果返回到本地卫星边缘计算节点。

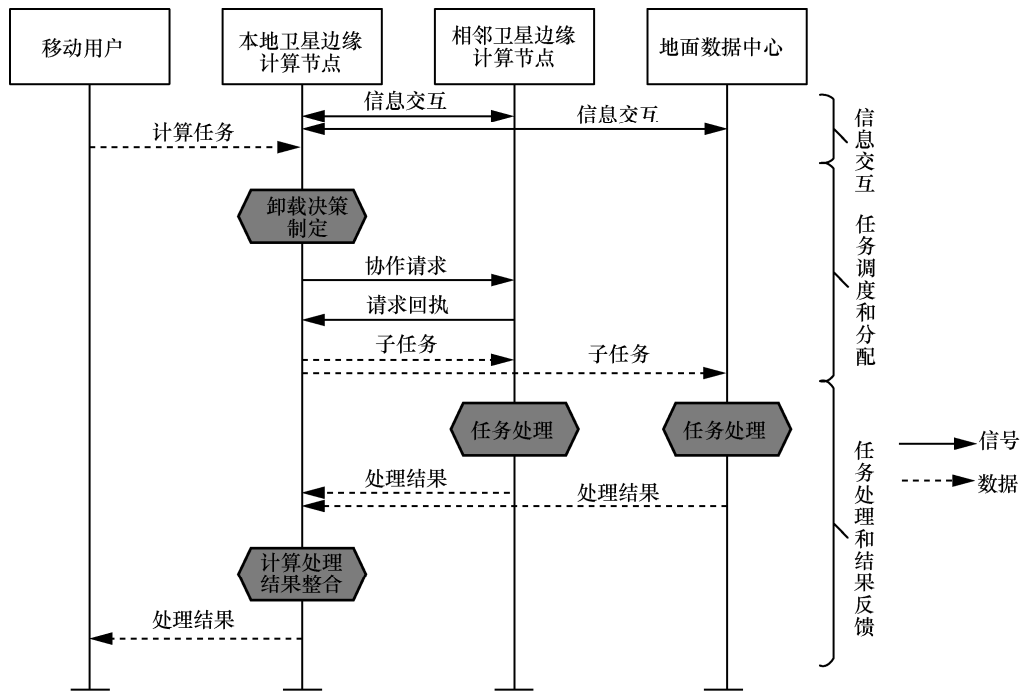


图 9 多节点协同任务调度流程

4.2 移动性管理

移动性管理主要指网络系统对移动设备通信维持的相应管理。为了保证终端在网络覆盖范围内的任何位置都能从网络中获取服务,并且保障服务的连续性,移动性管理的作用尤其突出,成为所有网络系统必须考虑的重要环节。

4.2.1 相关工作进展研究

移动性管理作为一个高移动性场景下必须考虑的关键性问题,已经得到了广泛的研究。本节分别从星地协同网络、移动边缘计算和融合网络 3 个方面整理了相关研究。

1) 星地协同网络中的移动性管理

星地协同网络的移动性管理相较于地面网络的移动性管理更复杂,因为在星地协同网络中不仅要考虑到终端设备的移动性,还需要对卫星的移动加以考量。国内外许多研究学者针对不同的优化目标提出了许多解决方案。针对网络可靠性,文献[53]提出了一种引入自适应神经模糊推理系统的切换算法,以减少不必要的切换,从而提高了融合网络的可靠性。文献[54]分析了基于 GEO 卫星的天地融合 IP 网络中航天器与地面用户之间的转发通信所产生的移动性管理问题,通过一种集中式路由控制方法保障路由切换成功率。文献[55]讨论了用于具有无人机移动控制的无线通信的 2 种关键技术,即启用无人机的移动中继和增强的 D2D 无人机信息分发。通过使用无人机作为移动中继,可减少地面上源与目的地之间的链路距离,实现吞吐量和能耗的优化。

2) 移动边缘计算中的移动性管理

边缘计算服务器在为终端设备提供服务时,实际上是边缘计算虚拟机中的应用程序在处理终端设备上传的计算任务。为了保障移动边缘计算中的服务连续性,当前移动边缘计算中的移动性管理主要从不同的优化角度对虚拟机迁移展开研究。文献[56]主要考虑了用户因为无法精准地获取信道条件和基站的计算能力而导致的移动性管理决策问题,通过 Q 学习算法对任务时延进行了优化。文献[57]将用户移动模型简化为一维移动模型,将虚拟机迁移策略制定为连续时间的马尔可夫决策过程,并提出了控制器的概念,以协助在启动虚拟机迁移时找到最佳阈值,进而决定是否进行虚拟机迁移。文献[58]提出了一种在线的、以用户为中心的移动性管理方案,以利用李雅普

诺夫优化方法和多臂老虎机理论,在使边缘计算性能最大化的同时,保持用户通信的能耗较低。其考虑了一种让用户做出移动性决策的方案,而不是传统的使用基站或演进分组核心网作为决策者的集中式方法。

3) 融合网络中的移动性管理

在融合网络中,卫星边缘计算平台上运行着多种边缘计算应用程序,从而能为用户终端提供多种边缘计算的服务。在低轨卫星网络中,用户终端的位置相对固定,并且移动速度较慢,而卫星的移动速度很快,因此终端需要频繁地进行通信卫星的切换并进行边缘计算应用程序的迁移。这种情况下,应用迁移的效率和质量会对用户终端的服务质量造成很大的影响,因此高效的移动性管理方案是不可或缺的。

当前针对融合网络的移动性管理研究较少,相关工作主要集中于用户设备的移动过程并从权衡用户体验和资源开销等角度来提出解决方案。文献[43]为卫星智能城市建立了基于车辆移动性的车辆计算资源地理迁移模型,并提出了一种通过资源定价影响车辆路径选择的激励方案,以平衡资源需求并在地理上分配计算资源。

表 4 列出了针对星地协同网络、移动边缘计算以及融合网络的移动性管理的详细分析,并对优化目标和技术方法进行了归纳和总结。在各个方案中,通过设计合理的移动管理方案以达到网络可靠性、时延、计算性能等方面的需求。当前针对融合网络的移动性管理的相关研究非常少,并且相关工作只是考虑用户设备的移动过程并从权衡用户体验和资源开销等角度来提出解决方案。然而在融合网络中,卫星的高速周期运动及卫星信道的复杂多变等问题才是移动性管理所面临的最主要挑战。对于时延敏感的应用,如果只在用户设备从切换完成后进行虚拟机迁移,将在短时间产生大量的数据从而降低网络质量,因此需要在卫星切换前完成迁移决策,并进行迁移,以实现高效的移动性管理。在此过程中,为了实现任务及时、可靠的迁移,一方面需要综合考虑卫星和用户设备的移动状况,预测和决策用户设备的切换;另一方面需要加强星间、星地间路由的管理,保证虚拟机能够快速、高效、可靠地完成迁移过程。结合这些挑战,本文将对融合网络中的移动性管理方案展开详细讨论。

表 4 移动性管理研究方案总结归纳

场景	优化目标	文献	方案	技术方法
星地协同网络	网络可靠性	文献[53]	在地面网络中使用 Hata 模型，在卫星网络中使用统计阴影模型	自适应神经模糊推理系统的切换算法
		文献[54]	研究位置管理和自动路由维护问题达到 100%路由切换成功率的性能	集中式路由控制算法
	吞吐量和能量	文献[55]	讨论了 UAV 的移动中继技术及信息分发技术，通过利用 D2D 通信和 UAV 移动性实现有效信息分发	—
移动边缘计算	时延	文献[56]	考虑到用户无法精准获取网络信息，解决系统信息不确定性导致的移动性管理问题	Q 学习算法
		文献[57]	设计了基于马尔科夫的虚拟机动态迁移策略，提出了利用控制器协助寻找最佳迁移阈值的方案	李雅普诺夫算法
	计算性能	文献[58]	以用户为中心进行移动性管理，最大化边缘计算性能，保持较低的用户通信能耗	—
融合网络	网络负载均衡	文献[43]	建立了基于车辆移动性的车辆资源地理迁移模型，提出了一种基于资源定价的车辆路径选择激励方案	动态资源迁移算法

4.2.2 融合网络架构下的移动性管理方案

本文设计了一种基于用户 QoE 保障的融合网络移动性管理方案，对融合网络中的服务迁移流程进行优化。该方案从用户终端发现更合适的新卫星开始，到新卫星可以为用户终端提供边缘计算服务为止，规范了每个过程的任务和主要事项。迁移卫星决策示意如图 10 所示，整个移动性管理方案包括以下 6 个过程。

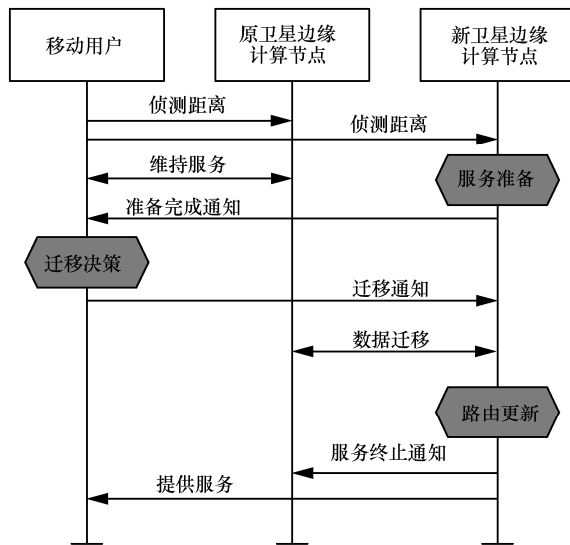


图 10 迁移卫星决策示意

① 侦测过程。用户终端通过对能够连接的卫星进行分析，从而确定卫星的位置变化，包括原卫

星的相对远离和新卫星的逐渐靠近。

② 维持过程。用户终端维持和原卫星的通信，这一过程要持续到决策、迁移和路由更新过程之后，直到新卫星已经做好为用户终端提供服务的准备。

③ 决策过程。考虑传输时延和处理时延等因素，用户终端会采用基于移动轨迹预测的隐马尔可夫决策对何时迁移进行决策，由于卫星的移动具有周期性，移动轨迹具有规律性，因此决策策略也将周期性与规律性考虑在内。

④ 迁移过程。如果已经决定进行应用程序迁移，首先用户终端会向新卫星发起通知，告知原卫星的 IP 地址，然后新卫星会和原卫星进行通信，接收原卫星传输来的用户终端数据和应用程序并重建，如果新卫星已经具有了需要迁移的应用程序，那么原卫星只需传输用户数据，不需传输应用程序数据。

⑤ 路由更新。在迁移结束后，新卫星进行路由更新，接替原卫星为用户终端提供边缘计算服务。

⑥ 终止过程。新卫星向原卫星发出通知，原卫星删除用户数据并断开与用户终端的通信，然后根据应用程序的使用情况来决定是否关闭并删除应用程序。

4.3 干扰管理

在融合 MEC 的星地协同网络中，当大量接入

设备同时接入 MEC 服务器时, 会出现严重的干扰问题。文献[59]针对边缘计算使能的小型蜂窝网络下的干扰协调策略进行了研究, 每个用户都根据归属基站与干扰基站之间的相对距离(称为干扰归零范围)来选择协调基站, 以此实现用户干扰协调性能的提升。类似地, 本文将针对融合 MEC 的星地协同网络下的干扰问题展开相应的讨论。

干扰的实质是资源利用中的冲突。因此, 干扰管理与网络资源管理密切相关。另外, 由于 MEC 服务器以分布式的形式部署在星地协同网络中, 终端任务处理请求数量大, 星地网络环境复杂, 资源利用率将大大降低。因此, 根据地面边缘网络、卫星边缘网络环境和用户终端任务计算的要求, 开发高效合理的资源配置是解决干扰问题的有效途径之一。一方面, 通过网络资源的合理利用, 提高网络资源的利用率, 增加网络容量。另一方面, 干扰管理可以反向修改资源分配策略, 进一步促进网络容量的提高。此外, 不均匀的干扰调度也是 MEC 融合星地协同网络中干扰管理面临的重要挑战之一。MEC 服务器在网络中的部署和覆盖不统一, 导致网络不同区域的干扰分布不均匀。因此, 结合位置信息和计算需求, 如何对干扰进行智能处理和干扰管理是未来的重要研究方向之一。

4.4 异构性

异构性问题也是融合 MEC 的星地协同网络面临的一个巨大挑战。在融合 MEC 的星地协同网络中, 计算资源存在于用户终端、低轨星座网络、地面边缘网络以及数据中心等不同的通信网络中, 由于不同通信网络自身的硬件条件以及所面向的主要业务类型不同, 不同通信系统的可用资源呈现出明显的异构特点。例如, 用户终端的计算处理资源主要使用 x86 处理器, 而部分卫星网络处于节能低功耗的目的, 使用的是进阶精简指令集机器(ARM, acorn RISC machine) 处理器。因此, 如何攻克各通信网络间存在的资源异构问题, 实现多层次、异构、泛在计算资源的融合与统一调度, 对于融合 MEC 的星地协同网络的实现具有十分重要的理论和现实意义。

尽管当前有一些相关文献, 如文献[60-61]等, 已经对星地协同网络的异构性进行了研究, 但是它们大多数是从架构设计、指标优化等角度出发对异构性问题展开分析和讨论, 而没有考虑到异构边缘计算平台的部署问题。从边缘计算平台部署的角度

出发, 解决边缘计算场景中星地协作网络的异构问题, 目前可行的方法之一就是使用 K3s。K3s 是 Kubernetes 的一种轻量级开源发行版, 设计用于在资源受限的环境中运行 Kubernetes, 特别是在边缘计算、IoT、ARM 等新兴场景中。K3s 还支持各种异构框架, 比如 x86_64、ARM64 和 ARMv7, 这使 K3s 可以在任何边缘基础设施上更灵活地工作。

5 开放性研究问题

为了充分发挥所提出的融合 MEC 的星地协同网络架构的优势, 还有一些潜在的开放性研究问题与挑战需要进一步探讨, 总结如下。

5.1 海量用户接入

由于星地协同网络的大规模连接需求, 卫星资源具有有限性和共享性的特点。为了解决卫星“传输距离远, 资源容量有限”与用户“大连接、低功耗、广域”之间的矛盾, 进一步满足用户的接入需求, 针对大规模用户的接入问题, 需要重点研究大规模连接条件下全球应用的用户上行链路接入策略和下行链路寻址策略, 以实现用户的接入控制和寻址。

5.2 大容量并发信号可靠接收

在星地协同网络中, 低轨卫星的覆盖范围非常大, 一个波束内往往包含大量的终端。在这种情况下, 信号碰撞是一种常态, 多址接入方式必须容忍这种碰撞。采用连续干扰消除(SIC, successive interference cancellation)被认为是一种非常有效的碰撞解决方案。但是, 对于大容量并发信号, 可能找不到不冲突的信号, 即没有干净的复制。在这种情况下, 考虑到信噪比的差异和已知的信号特征参数, 利用信号分离技术可以检测出信噪比最大的信号, 并在原始混合信号中采用信号重构和信号抵消技术, 消除解析信号以减少碰撞对系统性能的影响。

5.3 网络安全与网络监管

融合 MEC 的星地协同网络可以提供多样化服务, 从而对星地协同网络的安全与监管提出了巨大的挑战。多异构终端的接入、应用网络部署与实现等都需要设计详细的网络监管模式进行管控。在星地协同网络的信息传输过程中, 如何实现信息传输的端口监控、低开销的天基网络监控和安全防护以及对于不同等级信息的安全隔离是重要的研究方向。

5.4 高效通信协议栈

由于星地网络终端分布范围广、信号传播时延长、工作条件不可控、可维护性差等特点,研究适合星地协同网络的高效通信协议栈,以解决时延较长、终端开机时间短以及处理能力弱对协议性能的不利影响。一般来说,终端的存储处理能力是有限的,并且大部分时间不在线以及所处的使用环境难以预测,易对信息安全造成不利影响。因此,还需要考虑在协议栈内添加相应的安全防护机制来加以解决。

5.5 传输体制设计

针对电磁频谱资源严重不足和多系统共频运行的现实,结合当前主流的网络技术系统和卫星信号传播距离、终端分布范围广等特点,面向小型化、低功耗、低成本的应用需求,通过分析不同用户和应用的终端形式、技术要求、工作环境和应用场景,频谱共享策略和无配置自适应传输系统设计问题是需要研究的关键问题。

6 结束语

由于边缘计算技术在响应速度和处理能力方面带来显著的性能提升,在星地协同网络中引入边缘计算技术成为重要发展趋势并引起了国内外研究人员的广泛关注。本文旨在对星地协同网络下的边缘计算架构与关键技术与挑战展开研究。首先分别概述了星地协同网络和 MEC 技术的基本架构,并讨论了星地协同网络中引入 MEC 技术的动机和 MEC 在星地协同网络中的部署位置。然后对融合 MEC 的星地协同网的基本概念和参考架构进行了概述,对其相关研究工作、融合架构设计、关键支撑技术及典型应用进行了探讨。最后对融合网络中的一些关键挑战和其他的一些开放性问题进行了细致的分析和讨论。

参考文献:

- [1] YAO H, WANG L, WANG X, et al. The space-terrestrial integrated network (STIN): an overview[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(9): 2-9.
- [2] CASONI M, GRAZIA C A, KLAPEZ M, et al. Integration of satellite and LTE for disaster recovery[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(3): 47-53.
- [3] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. *通信学报*, 2015, 36(6): 157-172.
- YI K C, LI Y, SUN C H, et al. Recent development and its prospect of satellite communications[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(6): 157-172.
- [4] CHIEN W C, LQOS C F, HOSSAIN M S, et al. Heterogeneous space and terrestrial integrated networks for IoT: architecture and challenges[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 15-21.
- [5] ARTIGA X, PEREZ-NEIRA A, BARANDA J, et al. Shared access satellite-terrestrial reconfigurable backhaul network enabled by smart antennas at mmwave band[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(5): 46-53.
- [6] CAO Y, GUO H, LIU J, et al. Optimal satellite gateway placement in space-ground integrated networks[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(5): 32-37.
- [7] DU J, JIANG C, ZHANG H, et al. Secure satellite-terrestrial transmission over incumbent terrestrial networks via cooperative beamforming[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(7): 1367-1382.
- [8] ZHANG J, ZHANG X, IMRAN M A, et al. Energy efficient hybrid satellite terrestrial 5G networks with software defined features[J]. *Journal of Communications & Networks*, 2017, 19(2): 147-161.
- [9] SANCHEZ M, SELVA D, CAMERON B, et al. Results of the MIT space communication and navigation architecture study[C]//*IEEE Aerospace Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-14.
- [10] OIKONOMOU I. The European defence agency and EU military space policy: whose space odyssey?[J]. *Space Policy*, 2012, 28(2): 102-109.
- [11] JAPAN. Basic plan on space policy, strategic headquarters for space policy[R]. Government of Japan, 2013.
- [12] 李凤华, 殷丽华, 吴巍, 等. 天地一体化信息网络安全保障技术研究进展及发展趋势[J]. *通信学报*, 2016(11): 156-168.
- LI F H, YIN L H, WU W, et al. Research status and development trends of security assurance for space-ground integration information network[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(11): 156-168.
- [13] KUMAR K, LIU J, LU Y H, et al. A survey of computation offloading for mobile systems[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2013, 18(1): 129-140.
- [14] CHEN X. Decentralized computation offloading game for mobile cloud computing[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 26(4): 974-983.
- [15] SHI W, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 637-646.
- [16] DU J, ZHAO L, FENG J, et al. Computation offloading and resource allocation in mixed fog/cloud computing systems with min-max fairness guarantee[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 66(4): 1594-1608.
- [17] WANG C, YU F R, LIANG C, et al. Joint computation offloading and interference management in wireless cellular networks with mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(8): 7432-7445.
- [18] CHANG Z, ZHOU Z, RISTANIEMI T, et al. Energy efficient optimization for computation offloading in fog computing system[C]//*IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [19] ETSI. Mobile-edge computing: introductory technical white paper[R]. ETSI White Paper, 2014.

- [20] MACH P, BECVAR Z. Mobile edge computing: a survey on architecture and computation offloading[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1628-1656.
- [21] WANG S, ZHANG X, ZHANG Y, et al. A survey on mobile edge networks: convergence of computing, caching and communications[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 6757-6779.
- [22] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [23] LUGLIO M, ROMANO S P, ROSETI C, et al. Service delivery models for converged satellite-terrestrial 5G network deployment: a satellite-assisted CDN use-case[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 142-150.
- [24] KANEV K, MIRENKOV N. Satellite cloud computing[C]//*IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 147-152.
- [25] ZHANG Z, ZHANG W, TSENG F H. Satellite mobile edge computing: improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 70-76.
- [26] LIU J, SHI Y, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [27] CONTI M, GIORDANO S. Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(1): 85-96.
- [28] AALAMIFAR F, LAMPE L, BAVARIAN S, et al. WiMAX technology in smart distribution networks: Architecture, modeling, and applications[C]//*IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [29] DEMESTICHAS P, GEORGAKOPOULOS A, KARVOUNAS D, et al. 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2013, 8(3): 47-53.
- [30] TALEB T, SAMDANIS K, MADA B, et al. On multi-access edge computing: a survey of the emerging 5G network edge architecture and orchestration[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1657-1681.
- [31] 于晓艺, 王珂, 邓中亮, 等. 融合 MEC 的卫星网络架构研究[J]. *信息通信技术与政策*, 2018(8): 22-27.
YU X Y, WANG K, DENG Z L, et al. Research on satellite network architecture based on MEC[J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2018(8): 22-27.
- [32] 谢人超, 廉晓飞, 贾庆民, 等. 移动边缘计算卸载技术综述[J]. *通信学报*, 2018, 39(11): 138-155.
XIE R C, LIAN X F, JIA Q M, et al. Survey on computation offloading in mobile edge computing[J]. *Journal on Communications*, 2018, 39(11): 138-155.
- [33] ZHANG W, ZHANG Z, CHAO H C. Cooperative fog computing for dealing with big data in the internet of vehicles: architecture and hierarchical resource management[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(12): 60-67.
- [34] SHUKLA R M, MUNIR A. A computation offloading scheme leveraging parameter tuning for real-time IoT devices[C]//*IEEE International Symposium on Nanoelectronic and Information Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 208-209.
- [35] HA K, PILLAI P, LEWIS G, et al. The impact of mobile multimedia applications on data center consolidation[C]//*IEEE International Conference on Cloud Engineering*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 166-176.
- [36] CISCO. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update 2016-2021 white paper[R]. 2017.
- [37] WANG W, TONG Y, LI L, et al. Near optimal timing and frequency offset estimation for 5G integrated LEO satellite communication system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 113298-113310.
- [38] VAQUERO L M, RODERO-MERINO L. Finding your way in the fog: towards a comprehensive definition of fog computing[J]. *Computer Communication Review*, 2014, 44(5): 27-32.
- [39] CAO S, WEI J, HAN H, et al. Space edge cloud enabling network slicing for 5G satellite network[C]//*International Wireless Communications & Mobile Computing Conference*. [S.n.: s.l.], 2019: 787-792.
- [40] WEI J, CAO S. Application of edge intelligent computing in satellite Internet of things[C]//*IEEE International Conference on Smart Internet of Things*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 85-91.
- [41] CHENG N, LYU F, QUAN W, et al. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: a learning-based approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(5): 1117-1129.
- [42] BI Y, HAN G, XU S, et al. Software defined space-terrestrial integrated networks: architecture, challenges, and solutions[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 22-28.
- [43] LIAO S, DONG M, OTA K, et al. Vehicle mobility-based geographical migration of fog resource for satellite-enabled smart cities[C]//*IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [44] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(7): 101-109.
- [45] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICO J L, et al. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 18(1): 236-262.
- [46] YE Q, LI J, QU K, et al. End-to-end quality of service in 5G networks: examining the effectiveness of a network slicing framework[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2018, 13(2): 65-74.
- [47] TANG F, FADLULLAH Z M, KATO N, et al. AC-POCA: anticommodation game based partially overlapping channels assignment in combined UAV and D2D-based networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(2): 1672-1683.
- [48] CHENG F, ZHANG S, LI Z, et al. UAV trajectory optimization for data offloading at the edge of multiple cells[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(7): 6732-6736.
- [49] ARANITI G, BISIO I, DE SANCTIS M, et al. Multimedia content delivery for emerging 5G-satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2016, 61(2): 1-14.
- [50] ALMUGHALLES W, CHAI R, LIN J, et al. Task execution latency minimization-based joint computation offloading and cell selection for MEC-enabled HetNets[C]//*Wireless and Optical Communications Conference*. [S.n.: s.l.], 2019: 1-5.
- [51] GUO H, LIU J. Collaborative computation offloading for multi-access

- edge computing over fiber-wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4514-4526.
- [52] GUO F, ZHANG H, JI H, et al. An efficient computation offloading management scheme in the densely deployed small cell networks with mobile edge computing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(6): 2651-2664.
- [53] FOONG K C. Mobility management for satellite/terrestrial multi-service convergence networks[C]//International Conference on Communication Software & Networks. Piscataway: IEEE Press, 2009: 362-366.
- [54] XU X, KOU B, FEI L, et al. Study on mobility technologies of space-ground integrated IP network toward GEO satellites[C]//IEEE International Conference on Computer and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1832-1836.
- [55] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [56] WANG J, LIU K, NI M, et al. Learning based mobility management under uncertainties for mobile edge computing[C]//IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [57] KSENTINI A, TALEB T, CHEN M. A Markov decision process-based service migration procedure for follow me cloud[C]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1350-1354.
- [58] XU J, SUN Y, CHEN L, et al. E2M2: energy efficient mobility management in dense small cells with mobile edge computing[C]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [59] LI C, ZHANG J, HAENGGI M, et al. User-centric intercell interference nulling for downlink small cell networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(4): 1419-1431.
- [60] SANAD I, MICHELSON D G. A framework for heterogeneous satellite constellation design for rapid response earth observations[C]//IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-10.
- [61] CHIEN W, LAI C, HOSSAIN M S, et al. Heterogeneous space and

terrestrial integrated networks for IoT: architecture and challenges[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 15-21.

[作者简介]



唐琴琴（1994-），女，广西桂林人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为边缘计算、车联网、星地协同网络等。

谢人超（1984-），男，福建南平人，博士，北京邮电大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为信息中心网络、移动网络内容分发技术、工业互联网、标识解析技术和移动边缘计算等。

刘旭（1996-），男，安徽阜阳人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为边缘计算、星地协同网络等。

张亚生（1969-），男，河北石家庄人，中国电子科技集团公司第五十四研究所研究员，主要研究方向为卫星网络、卫星移动通信等。

何辞（1983-），女，河北石家庄人，中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师，主要研究方向为卫星网络、卫星移动通信等。

李诚成（1989-），男，河北石家庄人，博士，中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师，主要研究方向为卫星网络、卫星移动通信等。

黄韬（1980-），男，重庆人，博士，北京邮电大学教授，主要研究方向为路由与交换、软件定义网络、内容分发网络等。